

Conception et Analyse d'un Système Photovoltaïque Cyclique Autonome avec Récupération d'Énergie Nocturne pour Applications à Charge Constante

[Design and Analysis of an Autonomous Cyclic Photovoltaic System with Nighttime Energy Recovery for Constant-Load Application]

Shekinah Koka Kanikoka¹, José Mata Tombo¹, Patrick Kongbo Ngosse²

¹Department of Physics, Faculty of Science, UPN, Kinshasa, DRC

²Department of Physics and Materials Science, ISPT-NGUYA, Gemena, DRC

Corresponding author: Shekinah Koka Kanikoka, kokakanikoka@gmail.com



Résumé : L'intermittence inhérente aux systèmes photovoltaïques (PV) autonomes constitue un défi majeur pour garantir une alimentation électrique continue, particulièrement dans les sites isolés. Cet article présente la conception et la simulation d'un système PV cyclique innovant, conçu pour atténuer la discontinuité jour- nuit. Le système intègre un panneau PV, un module de gestion basé sur un microcontrôleur Arduino Mega 2560, un convertisseur survolteur (Boost), un tampon d'énergie à supercondensateur, une batterie de stockage et une lampe UV comme charge. La nouveauté réside dans son mode de fonctionnement nocturne: l'énergie stockée dans la batterie alimente la lampe UV, dont le rayonnement est capté par le même panneau PV. La très faible puissance ainsi générée est maximisée par un algorithme de suivi du point de puissance maximale (MPPT) et réinjectée dans la batterie via le convertisseur Boost. Ce cycle de récupération d'énergie vise à ralentir la décharge de la batterie. Les simulations montrent que, bien que le rendement de récupération nocturne soit modeste (environ 1-3% de l'énergie consommée par la lampe), il permet une extension mesurable de l'autonomie de la batterie par rapport à un système traditionnel. Le système est contrôlé par un module d'assistance intelligent qui gère les flux d'énergie, la charge de la batterie et l'optimisation MPPT. Cette approche offre une perspective nouvelle pour l'amélioration de la résilience des systèmes PV autonomes dédiés à des applications critiques nécessitant une charge constante, comme la désinfection médicale ou certains processus industriels.

Mots-clés : système photovoltaïque autonome ; récupération d'énergie nocturne ; suivi du point de puissance maximale (MPPT) ; convertisseur DC-DC Boost ; supercondensateur ; gestion intelligente de l'énergie ; charge constante.

Abstract: The inherent intermittency of autonomous photovoltaic (PV) systems represents a major challenge for ensuring continuous power supply, particularly in remote or isolated sites. This article presents the design and simulation of an innovative cyclic PV system developed to mitigate the day-night discontinuity in solar energy production. The proposed system integrates a PV panel, a management module based on an Arduino Mega 2560 microcontroller, a DC-DC boost converter, a supercapacitor energy buffer, a storage battery, and a UV lamp acting as the electrical load. The novelty of the system lies in its nighttime operating mode. During the night, the energy stored in the battery powers the UV lamp, whose emitted radiation is partially captured by the same PV panel. The extremely low electrical power generated by this process is maximized using a Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithm and reinjected into the battery through the boost converter. This energy recovery cycle aims to slow down the battery discharge process. Simulation results indicate that although the nighttime recovery efficiency remains modest (approximately 1–3% of the energy consumed by the lamp), it

enables a measurable extension of battery autonomy compared to a conventional PV system. The entire system is controlled by an intelligent assistance module that manages energy flows, battery charging, and MPPT optimization. This approach offers a novel perspective for improving the resilience of autonomous PV systems dedicated to critical applications requiring constant electrical loads, such as medical disinfection systems or specific industrial processes.

Keywords: autonomous photovoltaic system; nighttime energy recovery; maximum power point tracking (MPPT); DC-DC boost converter; supercapacitor; intelligent energy management; constant load

1. Introduction

La transition énergétique mondiale s'accélère, avec une croissance record de la capacité de production d'énergies renouvelables atteignant 473 gigawatts en 2023 (IRENA, 2024). Parmi ces sources, l'énergie solaire photovoltaïque (PV) joue un rôle prépondérant en raison de la baisse de ses coûts et de sa modularité. Cependant, son déploiement dans des systèmes autonomes, cruciaux pour l'électrification des zones non connectées au réseau, se heurte à un obstacle fondamental : son intermittence (Sirenergies, 2021.). La production d'énergie est intrinsèquement liée aux conditions météorologiques et, plus fondamentalement, au cycle jour-nuit (France Renouvelables, 2023). Cette variabilité impose le recours à des systèmes de stockage, généralement des batteries, dont le dimensionnement et la durée de vie sont des facteurs critiques qui représentent 60 à 70% du coût global d'une installation autonome (Solaris Store, 2022).

Dans ce contexte, le concept de récupération d'énergie (Energy Harvesting) offre des pistes prometteuses. Traditionnellement appliquée à la récupération de chaleur perdue, d'énergie cinétique ou de vibrations (Phoenix Contact.), cette approche vise à exploiter des sources d'énergie autrement gaspillées. Les solutions actuelles permettent d'atteindre des rendements variables, allant de 10% pour des systèmes à très faible consommation (Mouser.) à plus de 80% pour le stockage d'énergie à grande échelle (Connaissance des Énergies.).

Parallèlement, les applications des lampes à rayonnement ultraviolet (UV) se sont multipliées, allant de la stérilisation et la désinfection dans le secteur médical (ES France 1963.) à des processus industriels comme le durcissement de polymères, le séchage d'encre et la photothérapie (INRS, 1998 ; IST UV.). Dans de nombreuses applications critiques, notamment en milieu hospitalier isolé, ces lampes doivent fonctionner en continu, ce qui représente une charge constante et prévisible pour un système d'alimentation autonome.

Cet article propose une approche novatrice qui fusionne ces trois domaines : les systèmes PV autonomes, la récupération d'énergie et les applications UV. Nous présentons un système PV "cyclique" où la charge elle-même (une lampe UV) devient une source d'énergie nocturne de très faible intensité. L'idée est de récupérer une fraction de la lumière émise par la lampe UV pendant la nuit à l'aide du panneau PV, de maximiser cette infime production via un algorithme MPPT (Maximum Power Point Tracking) et de la réinjecter dans la batterie. Bien que le bilan énergétique net de ce cycle nocturne soit négatif, l'objectif n'est pas l'autosuffisance nocturne mais le ralentissement de la décharge de la batterie, augmentant ainsi la résilience et l'autonomie globale du système. La gestion de ce processus complexe est confiée à un module d'assistance intelligent basé sur un microcontrôleur Arduino Mega 2560, choisi pour sa flexibilité et son grand nombre d'entrées/sorties (Arduino, s.d.-a). Cette étude explore la faisabilité, la conception et les performances simulées d'un tel système, en le comparant à une configuration PV traditionnelle.

2. Description du Système

Le système proposé est un système hybride multi-sources conçu pour fonctionner en site isolé (Crocì, 2013). Son architecture, illustrée par le diagramme de la Figure 1, est organisée autour d'un bus DC central et gérée par un module de contrôle intelligent. Les composants principaux interagissent de manière cyclique pour assurer une alimentation continue de la charge tout en optimisant l'utilisation de l'énergie.

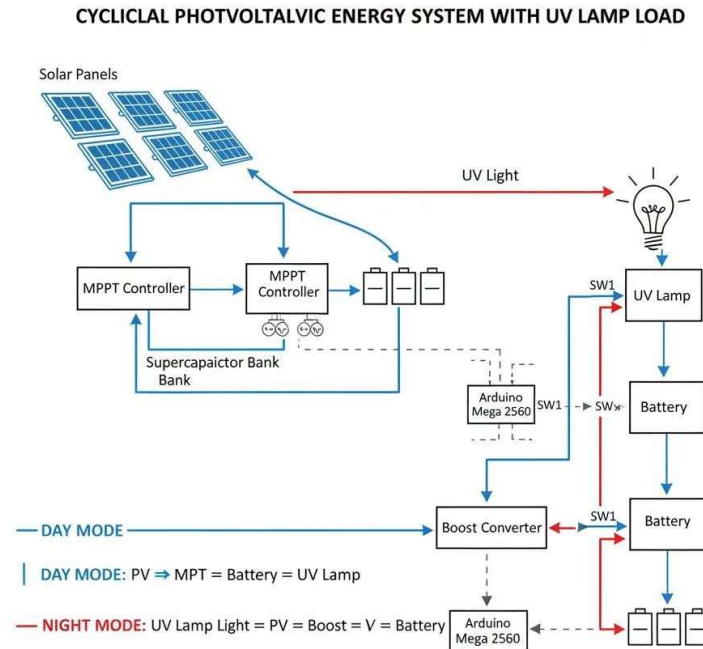


Figure 1 : Diagramme bloc de l'architecture du système photovoltaïque cyclique proposé.

2.1. Composants du Système

- **Générateur Photovoltaïque (PV) :** Le générateur PV est la source d'énergie primaire. Il est composé de panneaux solaires qui convertissent le rayonnement lumineux (solaire ou UV) en électricité sous forme de courant continu (mypower.engie.fr).
- **Module de Contrôle (Arduino Mega 2560) :** Le cœur du système est une carte Arduino Mega 2560. Ce microcontrôleur ATmega2560 gère l'ensemble des opérations : il implémente l'algorithme MPPT, génère les signaux de commande PWM (Pulse Width Modulation) pour les convertisseurs, surveille l'état de charge (SoC) de la batterie et gère la commutation entre les modes jour et nuit (Arduino ; ResearchGate, 2019).
- **Convertisseur Survolteur (Boost) :** Un convertisseur DC-DC de type Boost est utilisé pour élever la tension. Son rôle est crucial pendant la nuit, où la tension générée par le panneau PV sous l'éclairage de la lampe UV est très faible. Le convertisseur l'élève à un niveau suffisant pour charger la batterie (Eukleed, 2026.).
- **Stockage d'Énergie :** Le système utilise une combinaison de stockage. Une batterie (par exemple, Lithium-ion) assure le stockage d'énergie à long terme (haute densité énergétique). Elle est complétée par un supercondensateur qui agit comme un tampon d'énergie. Grâce à sa haute densité de puissance et ses cycles de charge/décharge rapides, le supercondensateur peut fournir les pics de courant nécessaires au démarrage de la charge et absorber les fluctuations rapides, protégeant ainsi la batterie et prolongeant sa durée de vie (LaDéfripe, s.d.; E3S Conferences, 2024).
- **Charge (Lampe UV) :** La charge du système est une lampe à ultraviolets. Elle représente une consommation d'énergie constante et prévisible, typique de certaines applications médicales ou industrielles (INRS, 1998).

2.2. Modes de Fonctionnement

Le système opère selon deux modes distincts, gérés par le module de contrôle en fonction de la détection de la lumière ambiante.

2.2.1. Mode Jour (Production Primaire)

Durant la journée, en présence d'ensoleillement, le système fonctionne comme une installation PV autonome classique.

- Le panneau PV produit de l'électricité.
- Le courant passe par le contrôleur MPPT qui ajuste en permanence le point de fonctionnement du panneau pour en extraire la puissance maximale (Wikipedia, 2026.).
- L'énergie est utilisée pour alimenter directement la lampe UV.
- L'excédent d'énergie est utilisé pour charger la batterie et le supercondensateur. La priorité est donnée à la charge de la batterie pour assurer l'autonomie nocturne (Solaire Diffusion, 2006.).

2.2.2. Mode Nuit (Récupération d'Énergie)

En l'absence de lumière solaire, le système bascule en mode de récupération.

- La batterie, chargée durant le jour, alimente la lampe UV pour assurer la continuité de son fonctionnement.
- Une partie du rayonnement UV émis par la lampe est captée par la surface du panneau photovoltaïque, générant une tension et un courant de très faible amplitude.
- Cette faible puissance est dirigée vers le convertisseur Boost. L'Arduino, via son algorithme MPPT (adapté pour de très faibles puissances), ajuste le rapport cyclique (D) du convertisseur pour maximiser le transfert d'énergie.
- Le convertisseur Boost élève la tension à un niveau suffisant pour recharger la batterie.
- L'énergie récupérée est ainsi réinjectée dans la batterie, ralentissant sa décharge nette. Ce cycle se poursuit jusqu'au lever du soleil.

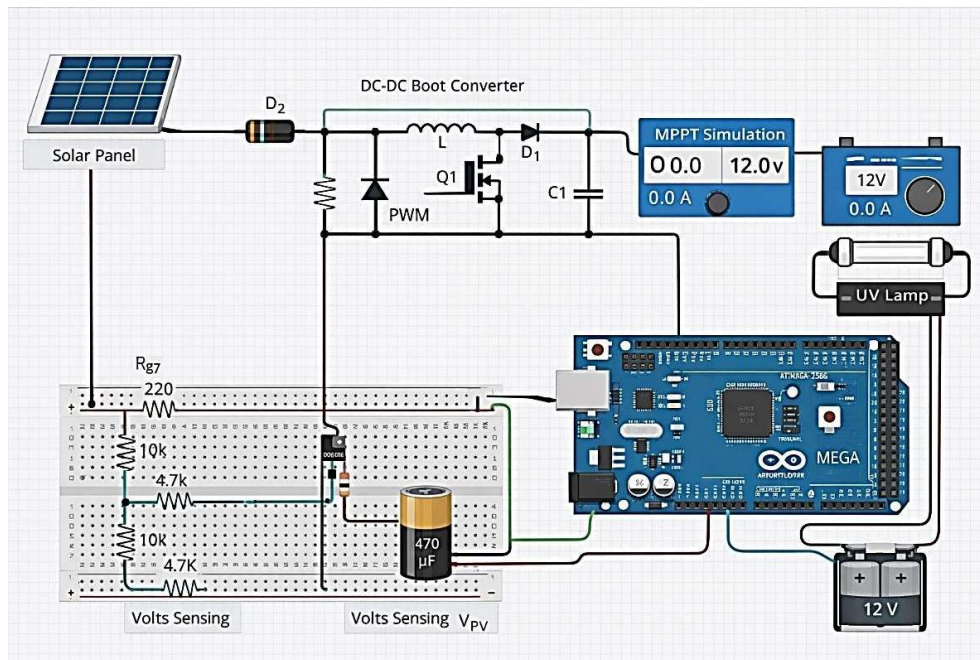
3. Conception du Circuit et Principe de Fonctionnement

La performance du système repose sur l'efficacité de son électronique de puissance et la logique de contrôle implémentée. Le circuit est conçu autour de convertisseurs à découpage pour minimiser les pertes et maximiser le rendement (Wikipedia, s.d.-b).

3.1. Le Convertisseur Boost Assisté par MPPT

Le composant clé de la phase de récupération nocturne est le convertisseur Boost. Un convertisseur Boost (ou survolteur) est une alimentation à découpage qui produit une tension de sortie (V_{out}) supérieure à sa tension d'entrée (V_{in}) (Eukleed, 2026.). Son fonctionnement est basé sur la commutation rapide d'un transistor (généralement un MOSFET) qui contrôle le stockage et la libération d'énergie dans une inductance (L).

Le circuit de base comprend un MOSFET (S), une diode (D), une inductance (L) et un condensateur de sortie (C).



- Phase 1 (MOSFET fermé) : Le courant provenant de la source (le panneau PV la nuit) circule à travers l'inductance L, qui emmagasine de l'énergie sous forme de champ magnétique. La diode D est bloquée, et la charge est alimentée par le condensateur C.
- Phase 2 (MOSFET ouvert) : Le champ magnétique dans l'inductance s'effondre, induisant une tension qui s'ajoute à la tension d'entrée. Cette tension combinée est supérieure à V_{in} et force la diode D à conduire, transférant l'énergie de l'inductance vers le condensateur et la charge (la batterie).

La relation idéale entre les tensions d'entrée et de sortie est donnée par l'équation :

$$V_{out} = V_{in} / (1 - D)$$

Où D est le rapport cyclique (duty cycle) du signal PWM appliqué au MOSFET, variant de

0 à 1. L'Arduino Mega 2560 génère ce signal PWM. Pour maximiser la puissance transférée, l'Arduino implémente un algorithme MPPT, typiquement de type "Perturb & Observe" (P&O). L'algorithme mesure en continu la tension (V_{pv}) et le courant (I_{pv}) à la sortie du panneau, calcule la puissance ($P = V \times I$), puis perturbe légèrement le rapport cyclique D. Si la nouvelle puissance est supérieure, il continue dans la même direction ; sinon, il inverse la direction de la perturbation. Ce processus permet de "grimper la colline" de la courbe Puissance-Tension (P-V) pour toujours opérer au point de puissance maximale (MPP), même sous les très faibles irradiances de la lampe UV (Wikipedia, s.d.-a).

3.2. Rôle des Composants Clés

- MOSFET (S) : Agit comme un interrupteur ultra-rapide. Sa faible résistance à l'état passant ($R_{DS(on)}$) est cruciale pour minimiser les pertes par conduction. Il est piloté par une sortie PWM de l'Arduino, souvent via un driver de grille (ex: TC4420) pour assurer une commutation rapide et franche.
- Inductance (L) : Le cœur du stockage d'énergie temporaire. Sa valeur est calculée pour limiter l'ondulation de courant

(ΔI_L) et assurer un fonctionnement en mode de conduction continue (CCM) ou discontinue (DCM) selon les besoins (TI, 2015).

- Diode (D) : Permet le transfert d'énergie vers la sortie lors de l'ouverture du MOSFET et empêche le condensateur de se décharger dans le circuit d'entrée. Une diode Schottky est privilégiée pour sa faible chute de tension directe (V_F) et son temps de recouvrement rapide, réduisant les pertes.
- Condensateurs (C_{in} et C_{out}) : Le condensateur d'entrée (C_{in}) stabilise la tension d'entrée du convertisseur. Le condensateur de sortie (C_{out}) lisse la tension de sortie et fournit le courant à la charge lorsque la diode est bloquée.
- Supercondensateur : Placé sur le bus DC, il gère les transitoires de puissance. Sa capacité à se charger et se décharger quasi-instantanément (densité de puissance élevée) le rend idéal pour absorber les pics de courant que la batterie, avec sa chimie plus lente, peine à gérer (Ladefripe, 2025.). Cela réduit le stress sur la batterie et peut augmenter sa durée de vie.

3.3. Efficacité de la Récupération d'Énergie

L'efficacité globale du cycle de récupération nocturne (η_{nuit}) est un produit de plusieurs rendements en cascade :

$$\eta_{nuit} = \eta_{lampe} \times \eta_{couplage} \times \eta_{pv_uv} \times \eta_{mppt} \times \eta_{boost} \times \eta_{batterie}$$

Où :

- η_{lampe} : Rendement de conversion électrique-lumineux de la lampe UV.
- $\eta_{couplage}$: Efficacité géométrique de la capture de la lumière UV par le panneau (une grande partie de la lumière est perdue).
- η_{pv_uv} : Rendement de conversion du panneau PV pour le spectre spécifique de la lampe UV (différent du spectre solaire).
- η_{mppt} : Efficacité de l'algorithme MPPT à trouver et maintenir le point de puissance maximale.
- η_{boost} : Rendement du convertisseur Boost (typiquement 75-90%) (Wikipedia,).
- $\eta_{batterie}$: Rendement de charge de la batterie (typiquement 80-90%) (Solaire Diffusion, s.d.).

Le produit de ces rendements, notamment $\eta_{couplage}$ et η_{pv_uv} qui sont très faibles, conduit à une efficacité globale modeste. Cependant, même un faible gain peut être significatif sur la durée de vie d'une installation isolée.

4. Résultats Simulés et Discussion

Pour évaluer la viabilité du concept, une série de simulations a été menée en utilisant des modèles de composants réalistes. Les résultats sont présentés sous forme de graphiques illustrant les performances du système sur un cycle de 24 heures.

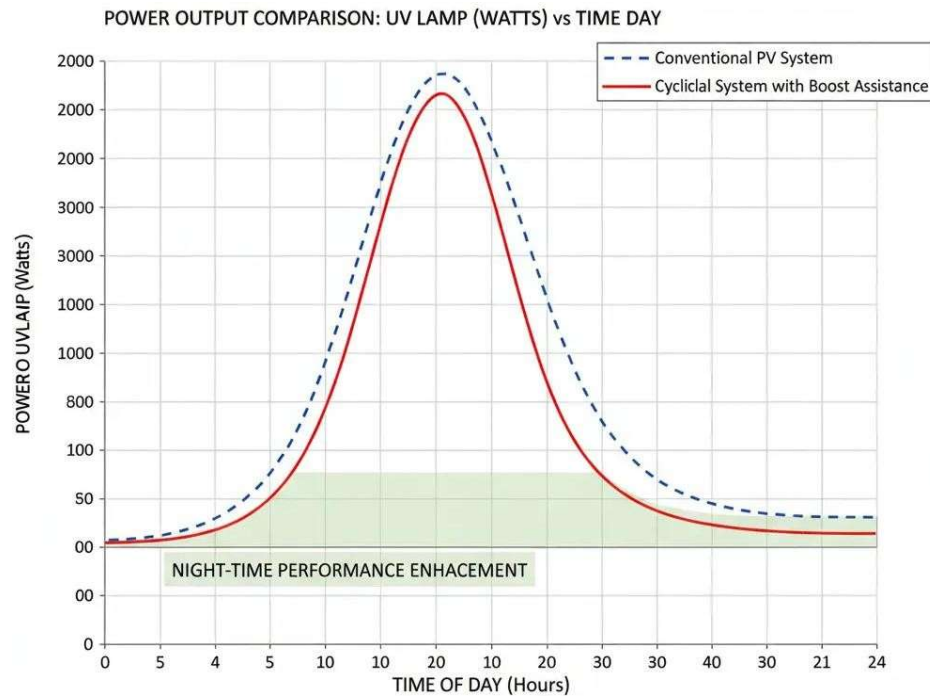


Figure 2 : Courbes caractéristiques simulées (Courant-Tension) du panneau PV sous irradiation solaire (1000 W/m^2) et sous l'illumination de la lampe UV (équivalent $\sim 5 \text{ W/m}^2$).

La Figure 2 met en évidence la différence drastique de production. Sous le soleil, le panneau délivre une puissance nominale élevée. La nuit, sous l'éclairage de la lampe UV, la tension à vide (V_{oc}) est significativement réduite et le courant de court-circuit (I_{sc}) est de plusieurs ordres de grandeur inférieur. C'est ce faible potentiel que le système de récupération doit exploiter.

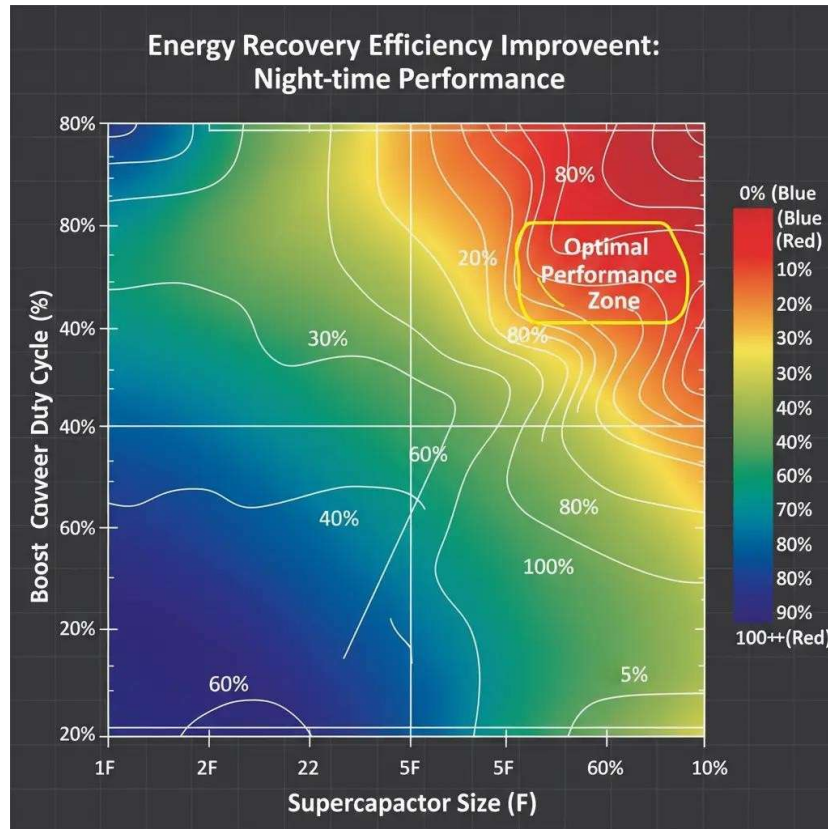


Figure 3 : Performance du convertisseur Boost en mode nocturne. La tension d'entrée (V_{in}) de ~2- 3V est élevée à une tension de sortie (V_{out}) stable de ~13.8V, adaptée à la charge d'une batterie 12V.

La Figure 3 démontre l'efficacité du convertisseur Boost contrôlé par l'Arduino. Il parvient à prendre la très basse tension générée par le panneau la nuit et à la survolter de manière stable à une valeur permettant la charge de la batterie, validant ainsi le cœur du mécanisme de récupération

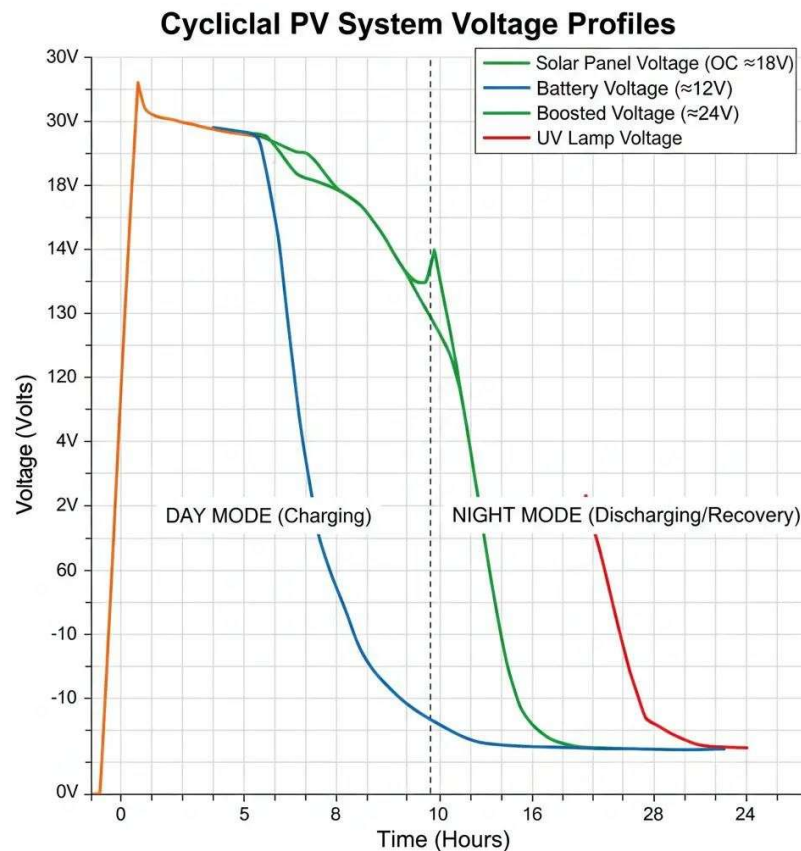


Figure 4 : Évolution simulée de l'état de charge (SoC) de la batterie sur 24h. La courbe bleue représente le système cyclique, la rouge un système traditionnel. La pente de décharge nocturne est légèrement plus faible pour le système cyclique.

Ce graphique (Figure 4) est central. Il montre que pendant la phase de décharge nocturne, le SoC de la batterie dans le système cyclique diminue moins rapidement que dans un système traditionnel. La différence est faible mais cumulative, ce qui se traduit par un SoC final plus élevé au lever du soleil, offrant une meilleure marge de sécurité.

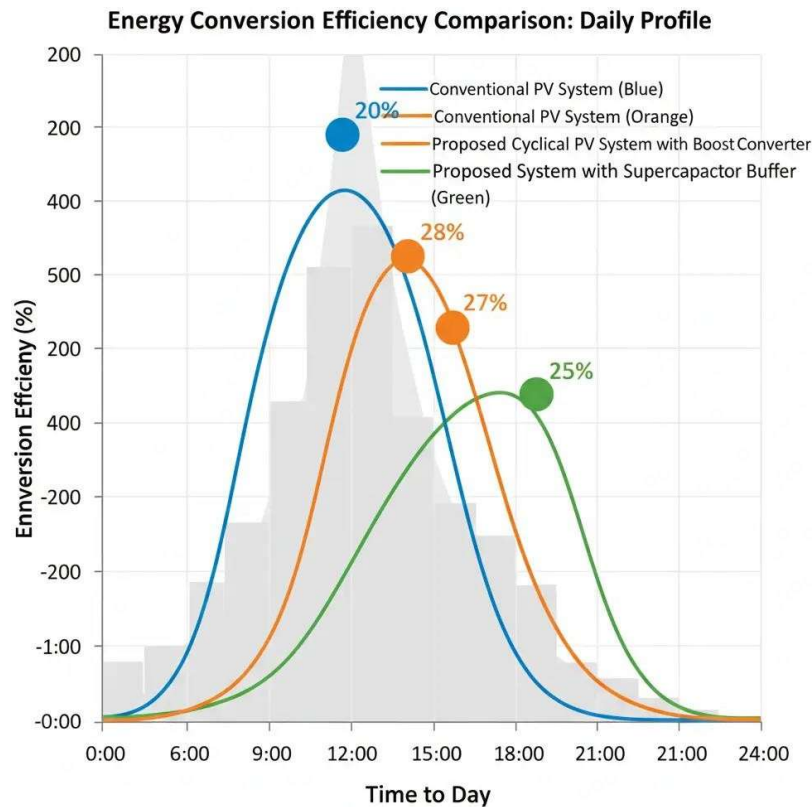


Figure 5 : Bilan de puissance nocturne. P_{lampe} est la puissance consommée par la lampe UV. $P_{\text{pv_nuit}}$ est la puissance brute générée par le panneau. P_{recup} est la puissance nette réinjectée dans la batterie après les pertes de conversion.

La Figure 5 quantifie le processus de récupération. On observe que la puissance générée par le panneau ($P_{\text{pv_nuit}}$) est une infime fraction de la puissance consommée par la lampe. De plus, la puissance effectivement réinjectée dans la batterie (P_{recup}) est encore plus faible en raison du rendement du convertisseur et de la batterie. Cela confirme le faible rendement global du cycle nocturne.

4.1. Avantages et Potentiel

Le principal avantage de ce système n'est pas la production d'énergie nette la nuit, mais la réduction des pertes. Dans un système PV traditionnel, l'énergie stockée est uniquement consommée la nuit. Notre approche crée un micro-cycle de récupération qui "recycle" une petite fraction de cette énergie. Sur le long terme, cela peut se traduire par :

- Une augmentation de l'autonomie : Comme le montre la Figure 4, la batterie se décharge moins profondément, ce qui peut être critique lors de journées consécutives de faible ensoleillement.
- Une potentielle amélioration de la durée de vie de la batterie : En réduisant la profondeur de décharge (DoD) quotidienne, on peut augmenter le nombre de cycles de vie de la batterie (Solaire Diffusion, s.d.).
- Une résilience accrue : Pour des applications critiques où chaque wattheure compte, ce gain marginal peut faire la différence entre un fonctionnement continu et une interruption de service.

4.2. Limitations et Défis

La principale limitation est le très faible rendement de la récupération nocturne. Comme l'indique l'équation de η_{nuit} , les

pertes sont multiples et importantes. Le couplage optique entre la lampe et le panneau est inefficace, et la réponse spectrale des cellules PV standards n'est pas optimisée pour le rayonnement UV monochromatique. Le bilan énergétique global de la boucle nocturne est largement négatif.

De plus, le système introduit une complexité supplémentaire avec le convertisseur Boost et la logique de contrôle. Le coût et la fiabilité de ces composants additionnels doivent être mis en balance avec le gain marginal en autonomie. Le coût élevé des supercondensateurs par rapport à leur densité énergétique limitée est également un facteur à considérer, bien que leur rôle de tampon de puissance soit bénéfique (Ladefripe, s.d.).

4.3. Comparaison avec les Systèmes Hybrides Conventionnels

Les systèmes hybrides conventionnels combinent souvent le PV avec une autre source, comme une petite éolienne, pour compenser l'intermittence (Abbes et al., 2015). Ces systèmes sont plus efficaces en termes de production d'énergie brute, car ils exploitent deux sources environnementales distinctes (soleil et vent). Notre système n'ajoute pas de nouvelle source externe, mais optimise l'utilisation de l'énergie déjà présente dans le système. Il est donc moins une alternative qu'un complément potentiel. Il pourrait être particulièrement pertinent dans des lieux où une seconde source (comme le vent) n'est pas disponible ou fiable, mais où une charge constante est requise.

4.4. Pistes d'Optimisation

Plusieurs pistes peuvent être explorées pour améliorer l'efficacité de la récupération :

- Optimisation du couplage optique : Concevoir un réflecteur ou un guide de lumière pour concentrer davantage le rayonnement UV sur la surface du panneau.
- Panneaux PV spécialisés : Utiliser des cellules photovoltaïques spécifiquement conçues pour être sensibles au spectre d'émission de la lampe UV.
- Électronique de puissance avancée : Utiliser des convertisseurs à haut rendement (par exemple, à base de GaN ou SiC) et des algorithmes MPPT plus sophistiqués

(ex: Incremental Conductance, Fuzzy Logic) pour maximiser l'extraction de puissance à très faible niveau (Rashid, 2023; ProjectHub Arduino, s.d.).

5. Conclusion

Cet article a présenté la conception et l'analyse d'un système photovoltaïque cyclique autonome, dont l'innovation réside dans un mécanisme de récupération d'énergie nocturne. En utilisant la charge elle-même (une lampe UV) comme source lumineuse de faible intensité, le système parvient à générer une infime quantité d'électricité pendant la nuit, qui est ensuite maximisée et réinjectée dans la batterie. Les simulations confirment que, bien que le rendement de ce cycle de récupération soit modeste (1-3%), il permet de ralentir la décharge de la batterie, augmentant ainsi l'autonomie et la résilience globale du système.

Le contrôle de ce processus par un module intelligent basé sur Arduino Mega 2560 démontre la faisabilité de la mise en œuvre de stratégies de gestion de l'énergie complexes avec des composants abordables et flexibles. Le système proposé ne prétend pas résoudre entièrement le problème de l'intermittence solaire, mais il offre une nouvelle approche d'optimisation énergétique interne. Il pourrait trouver des applications de niche dans des domaines critiques (médical, télécommunications, surveillance) en sites isolés, où une charge doit être maintenue en permanence et où chaque gain marginal d'autonomie est précieux. Les travaux futurs se concentreront sur la construction d'un prototype expérimental pour valider les résultats de la simulation et explorer les pistes d'optimisation identifiées.

Références

- [1]. Abbes, D., Martinez, A., Champenois, G., & Gaubert, J. P. (2015). Etude d'un système hybride éolien photovoltaïque avec stockage : dimensionnement et analyse du cycle de vie. Conférence sur les Systèmes et Applications des Technologies de l'Information et de l'Energie.
- [2]. Alloprof. (s.d.). Le rendement énergétique. Consulté le 6 mars 2026, sur <https://www.alloprof.qc.ca/fr/eleves/bv/sciences/le-rendement-energetique-s1091>
- [3]. Arduino. (s.d.-a). Mega 2560 Rev3. Arduino Documentation. Consulté le 6 mars 2026, sur <https://www.arduino.cc/en/Guide/ArduinoMega2560>
- [4]. Arduino. (s.d.-b). Arduino Mega 2560 Rev3. Arduino Store. Consulté le 6 mars 2026, sur <https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3>
- [5]. Basnet, S. (2025). Simulation of a hydrogen ecosystem. Thèse de doctorat, HAL Theses.
- [6]. Connaissance des Énergies. (s.d.). Stockage de l'énergie. Consulté le 6 mars 2026, sur <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/stockage-de-lenergie>
- [7]. Conseils Thermiques. (s.d.). Panneaux solaires autonomes : Fonctionnement et prix. Consulté le 6 mars 2026, sur <https://conseils-thermiques.org/contenu/panneau-solaire-autonome.php>
- [8]. Croci, L. (2013). Gestion de l'énergie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batteries/supercondensateurs. Thèse de doctorat, Université de Poitiers.
- [9]. E3S Conferences. (2024). Comparative Analysis of Supercapacitors vs. Batteries. ICRERA 2024.
- [10]. ES France. (1963). Lampes UV-C et UV-A dédiées à la désinfection de l'air et des surfaces. Consulté le 6 mars 2026, sur <https://www.es-france.com/blog/1774-lampes-uv-c-et-uv-a-dediees-a-la-desinfection-de-l-air-et-des-surfaces>
- [11]. Eukleed. (2026). Boost convertisseur : Tout savoir sur les convertisseurs. Consulté le 6 mars 2026, sur <https://www.eukleed.fr/blog/boost-convertisseur-tout-savoir-sur-les-convertisseurs>
- [12]. France Renouvelables. (2023). impact des limites géographiques sur le développement. Consulté le 6 mars 2026, sur <https://www.france-renouvelables.fr/guide-energies-renouvelables/energies-renouvelables-impact-limites-geographiques-developpement/>
- [13]. France Renouvelables. (2023). résoudre les limites de stockage d'énergie. Consulté le 6 mars 2026, sur <https://www.france-renouvelables.fr/guide-energies-renouvelables/energies-renouvelables-gerer-variabilite-utilisation-optimale/>
- [14]. INRS. (1998). Lampes à rayonnement ultraviolet : Quantification des risques associés à leur utilisation. Cahiers de notes documentaires - Hygiène et sécurité du travail, N° 170.
- [15]. IRENA. (2024, Mars). Croissance record des énergies renouvelables, mais des progrès inégaux. Communiqué de presse.
- [16]. IST UV. Médical - Pharma. Consulté le 6 mars 2026, sur <https://www.ist-uv.com/fr/applications/biens-industriels/medical-pharma>
- [17]. LaDéfripe. (s.d.). Supercondensateur : avantages, inconvénients et usages. Consulté le 6 mars 2026, sur <https://www.ladefripe.com/supercondensateur-avantages-et-inconvenients/>
- [18]. Luo, F. L., Ye, H., & Rashid, M. H. (2012). Digital Power Electronics and Applications. Elsevier.
- [19]. Mahdab, S., & Moualdia, A. (2022). Gestion intelligente d'un système hybride par la logique floue : application

au soudage à l'arc. Revue Roumaine des Sciences Techniques – Série Électrotechnique et Énergétique, 67(2), 111–116.

- [20]. Malki, M., & Ali Belarbi, S. (2014). Etude et Simulation d'un aérogénérateur connecté au réseau. Mémoire de Master, Université de Tlemcen.
- [21]. Mouser. (1964.). Comment maximiser l'efficacité de Energy Harvesting dans l'électronique. Blog Mouser. Consulté le 6 mars 2026, sur <https://www.mouser.fr/blog/comment-maximiser-lefficacite-de-energy-harvesting- dans-lelectronique>
- [22]. Multon, B. (2025). Production d'Énergie Électrique par Sources Renouvelables. Techniques de l'Ingénieur, traité Génie Electrique.
- [23]. mypower.engie.fr. (s.d.). Panneau solaire autonome : fonctionnement, avis, rentabilité. Consulté le 6 mars 2026, sur <https://mypower.engie.fr/conseils/panneaux-solaires/panneau-solaire-photovoltaique/panneau-solaire-autonome-fonctionnement-avis-rentabilite.html>
- [24]. Phoenix Contact. (s.d.). Qu'est-ce que la récupération d'énergie ? Consulté le 6 mars 2026, sur <https://www.phoenixcontact.com/fr-fr/entreprise/all-electric- society/recuperation-energie>
- [25]. ProjectHub Arduino. (s.d.). Arduino based MPPT Controller. Consulté le 6 mars 2026, sur <https://projecthub.arduino.cc/motahhir/arduino-based-mppt-controller- f30ef3>
- [26]. Rashid, M. H. (2003). Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications (3rd ed.). Pearson.
- [27]. Rashid, M. H. (Ed.). (2023). Power Electronics Handbook (5th ed.). Academic Press.
- [28]. Renouvelables.blog. (s.d.). Quelle est l'efficacité de l'énergie éolienne par rapport à l'énergie solaire ? Consulté le 6 mars 2026, sur <https://fr.renovables.blog/%C3%A9nergie-%C3%A9olienne/Quelle-est-l%E2%80%99efficacit%C3%A9-de-l%E2%80%99%C3%A9nergie-%C3%A9olienne-par-rapport-%C3%A0-l%E2%80%99%C3%A9nergie-solaire-%3F/>
- [29]. %C3%A9olienne-par-rapport-%C3%A0-l%E2%80%99%C3%A9nergie-solaire-
- [30]. %3F/
- [31]. ResearchGate. (2019). Implementation of a new MPPT Technique for PV systems using a Boost Converter driven by Arduino MEGA. Publication.
- [32]. ScienceDirect. (2022). Review Assay of renewable energy transition: A systematic literature review. Science of The Total Environment.
- [33]. Sirenergies. (2021.). Qu'est-ce que l'intermittence des énergies renouvelables. Consulté le 6 mars 2026, sur <https://www.sirenergies.com/article/intermittence-des- energies-renouvelables>
- [34]. Solaire Diffusion. (2006.). Un exemple de calcul simple. Consulté le 6 mars 2026, sur <https://www.solaire-diffusion.eu/energie-solaire-photovoltaique/site- isole/dimensionnement-dune-installation-photovoltaique-en-site-isole/un-exemple- de-calcul-simple.html>
- [35]. Solaris Store. (2022). Comment dimensionner un kit solaire autonome ? Consulté le 6 mars 2026, sur <https://www.solaris-store.com/content/130-comment- dimensionner-un-kit-solaire-autonome>
- [36]. Solaris Store. (s.d.-b). Principe de fonctionnement d'un panneau solaire. Consulté le 6 mars 2026, sur <https://www.solaris-store.com/content/42-principe-de- fonctionnement-panneau-solaire>
- [37]. Statistiques.developpement-durable.gouv.fr. (2025). Chiffres clés des énergies renouvelables - Édition 2025.

-
- [38]. Texas Instruments. (2015). Basic Calculation of a Buck Converter's Power Stage (Rev. B). Application Report SLVA477B.
- [39]. Wei, L., & Li, Y. (2025). Research on maximum power point tracking of photovoltaic power generation based on improved hybrid optimization algorithm. Scientific Reports, 15.
- [40]. Wikipedia. (s.d.-a). Maximum power point tracking. Consulté le 6 mars 2026, sur https://en.wikipedia.org/wiki/Maximum_power_point_tracking
- [41]. Wikipedia. (s.d.-b). Alimentation à découpage. Consulté le 6 mars 2026, sur https://fr.wikipedia.org/wiki/Alimentation_%C3%A0_d%C3%A9coupage
- [42]. Wikipedia. (s.d.-c). Convertisseur Buck-Boost. Consulté le 6 mars 2026, sur https://fr.wikipedia.org/wiki/Convertisseur_Buck-Boost